

광대역 펄스 광원을 이용한 푸리에 도메인 OCT

Fourier-Domain Optical Coherence Tomography Using a Stretched-Pulse Supercontinuum Source

문석배*, 김덕영*

*광주과학기술원 정보통신공학과

moonsb@gist.ac.kr

광학 결맞음 단층 영상법(optical coherence tomography; OCT)은 광산란 신호를 광학 결맞음(coherence) 특성을 이용하여 얻어내는 이미징 기술로 높은 분해능과 감도로 생체 샘플의 2차원 및 3차원적 구조를 고속으로 파악할 수 있는 방법이다. 최근에 집중적으로 연구되고 있는 푸리에 도메인 OCT (Fourier-domain OCT)는 기준 거울(reference mirror)의 움직임 없이 주파수축에서 간섭 정보를 획득하며 감도 저하없이 높은 이미징 속도를 얻을 수 있다. 주파수축에서의 간섭 정보 획득은 광학 격자(grating)와 배열형 광디텍터(array photodetector)를 이용한 분광기를 통해서 이뤄질 수도 있고, 시간에 따라 발전 주파수가 변하는 주파수-변이 레이저(frequency-swept laser)를 통해 이뤄질 수도 있다. 특히 주파수-변이 레이저를 이용한 경우 매우 높은 속도로 이미징을 수행할 수 있음이 밝혀졌다.⁽¹⁾

기존 주파수-변이 레이저는 대부분 기계적 움직임에 의존하는 파장가변 필터를 사용하기 때문에 그 가변 속도에 제한이 따른다. 또한 이런 레이저의 주파수 변이 (frequency sweep) 특성은 단조롭지 않고 예측 불가능하기 때문에 OCT 시스템은 별도의 주파수 재측정 (frequency recalibration)을 위한 구성 요소가 필요하며 재측정된 주파수 변화 특성은 신호 처리에 반영되어야 하는 번거로움이 있다. 또한 획득 가능한 대역폭이 레이저의 이득매질에 의해 결정되므로 파장 대역폭이 100nm 이하 수준으로 깊이 방향 분해능이 10 μ m 수준에 불과하다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 우리는 광대역 초연속광(supercontinuum) 광원의 짧은 펄스형 출력을 긴 광섬유를 통과시켜 색분산(group-velocity dispersion; GVD)에 의해 인장(stretching)되는 방법을 통해 광 주파수가 연속적으로 변화하는 주파수-변이 펄스를 얻었다. 이러한 방법을 통해 생성된 광은 단조로운(monotonic) 주파수 변이 특성을 지니고 있어 주파수 재측정의 문제가 없고, 매우 높은 속도로 측정이 가능하며, 넓은 대역폭을 활용할 수 있는 이점이 있다. 본 논문에서는 이러한 인장된 초연속광 펄스를 이용한 OCT 이미징 기법과 그 특성을 보고하고자 한다.

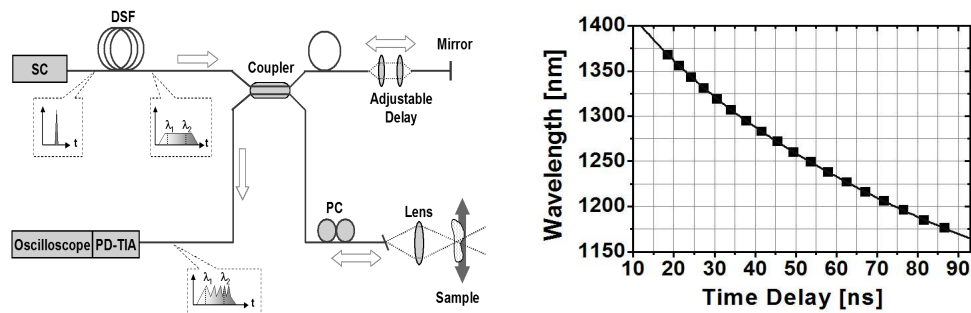


그림 1. 인장-펄스를 이용한 푸리에 도메인 OCT의 기본 구성을 보여주는 구성도와 (좌측) 측정된 인장-펄스의 시간-주파수 관계 (우측).

그림 1은 인장-펄스를 이용한 푸리에 도메인 OCT의 기본 구성을 보여주는 구성도와 측정된 인장-펄스의 시간-주파수 관계를 보여준다. 초연속광 생성은 1550nm 파장의 레이저 다이오드 펄스를 증폭시켜 고비선형 분산천이 광섬유(highly-nonlinear DSF)에 인가하는 방식으로 생성되었다.⁽²⁾ 20km 길이의 분산천이 광섬유(DSF)에 생성된 초연속광 펄스를 통과시켜서 그 GVD에 의해 펄스가 인장되게 된다. 이렇게 인장된 펄스는 펄스 내부의 상대적 시간 위치별로 DSF의 GVD 특성을 반영하는 주파수를 갖게 되어 주파수-변이 광원으로 활용될 수 있게 된다. OCT 시스템은 1.3 μm 의 중심 파장을 갖는 광섬유 커플러를 이용하여 마이켈슨 간섭계를 구성하는 방식으로 꾸며졌으며, 이미지 데이터의 획득은 샘플의 수평(transverse) 방향으로 움직이면서 이뤄졌다. 펄스의 반복률은 3.7MHz였고 이는 초당 3.7×10^6 개의 A-라인을 획득할 수 있음을 의미한다. 이 속도는 기존의 방법을 통해 얻을 수 있는 최대 속도보다 10배 이상이고 통상적인 푸리에 도메인 OCT 시스템보다 100배 이상의 속도이다.⁽¹⁾

그림 2는 단일한 반사면을 가진 샘플을 축방향으로 위치를 바꿔가며 얻은 OCT의 점확산 함수(point-spread function, PSF)와 OCT 시스템을 이용하여 얻은 이미지를 보여준다. 깊이 범위는 인장-펄스의 매우 빠른 주파수-변이 특성에 의해 제한받아 좁아지는 특성이 있다. 1.3GHz의 대역폭과 초당 4GHz 속도로 표본화하는 수광 시스템을 사용하여 400 μm 수준의 깊이 범위를 얻었다. 감도(sensitivity)는 -67dB로 평가되었으며 인접 A-라인 데이터를 평균화하는 방식으로 개선될 수 있다. 16개의 인접 라인을 평균화하여 푸리에 변환을 하는 방식으로 데이터를 처리하였을 때에는 -82dB의 감도를 얻을 수 있었다. 축방향 분해능은 공기 중에서 최대 3.6 μm 로 평가되었다. 그림 2의 OCT 이미지(우측)는 미꾸라지의 피부를 샘플로 이용하여 얻어졌으며, 이미지는 450 μm x 450 μm 영역을 보여주고 있다. 이미지는 16 라인 평균화를 적용했으며 이미지 데이터의 획득 시간은 0.25ms였다.

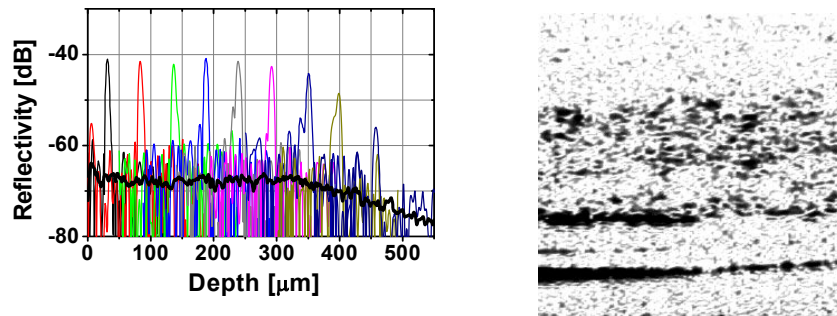


그림 2. 단일한 반사면을 가진 샘플을 축방향으로 위치를 바꿔가며 얻은 OCT의 점확산 함수(point-spread function, PSF)와 (좌) OCT 시스템을 이용하여 얻은 이미지 (우측).

본 논문에서는 긴 광섬유의 GVD를 통해 인장시킨 초연속광 펄스를 주파수-변이 광원으로 이용하는 푸리에 도메인 OCT 영상 기법을 소개하였다. 개발된 방법은 빠른 이미징 속도와 높은 분해능을 가지며, 주파수 재측정 없이도 정확한 데이터 획득할 수 있음이 확인되었다. 이러한 이점으로 인해 제안된 OCT 이미징 기법은 고분해능으로 실시간 3차원 구조를 파악하거나 빠른 속도로 변화하는 샘플의 동역학적 특성을 파악하는 등의 응용에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement

This work was supported by Creative Research Initiatives program of MOST/KOSEF.

참고문헌

1. R. Huber, M. Wojtkowski, J. G. Fujimoto, Opt. Express 14, p.3225 (2006).
2. S. Moon, D. Y. Kim, Opt. Express 14, p.270 (2006).